

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با استفاده از پایه‌های منشوری

ابراهیم ولیزادگان^{۱*} و سمیه عباسی^۲

۱ و ۲ به ترتیب: استادیار؛ و کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، خوی، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۸/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۱۱

نوع مقاله: علمی پژوهشی

چکیده

یکی از روش‌های مرسوم و ساده برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌ها، استفاده از فلوم است. در فلوم یا اندازه‌گیری عمق جریان در نقاط مشخص مقطع کنترل می‌توان دبی جریان را به‌دست آورد. در این تحقیق پس از بررسی روابط پیشنهادی محاسبه دبی جریان، امکان ایجاد مقطع کنترل با نصب پایه‌های منشوری در محور مرکزی کف کانال دوزنقه‌ای و اندازه‌گیری دبی جریان، مطالعه شد. بررسی‌های آزمایشگاهی بر اساس ۳۸۴ آزمایش روی چهار پایه منشوری در چهار شیب جانبی متفاوت صورت گرفت و با استفاده از آنالیز ابعادی، برای هر شیب جانبی معین، در شرایط جریان‌های آزاد و مستغرق رابطه تعیین دبی جریان به‌دست آمد. برای تعیین دقت روابط و نمودارهای به‌دست آمده، از پارامترهای آماری حداکثر خطا (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط قدر مطلق خطای نسبی (MARE) استفاده شد. حداکثر مقدار برای متوسط قدر مطلق خطای نسبی در برآورد دبی جریان با استفاده از رابطه مختص یک شیب جانبی معین، معادل ۶/۳ و ۱۲ درصد به ترتیب در شرایط جریان آزاد و مستغرق به‌دست آمد. متوسط قدر مطلق خطای نسبی بر اساس رابطه به‌دست آمده برای شیب‌های جانبی مختلف در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب ۸/۳ و ۱۰/۲ درصد و بر اساس رابطه پیشنهادی تعیین دبی که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق به‌دست آمده، ۱۹ درصد است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، استفاده از این روش اندازه‌گیری جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای در شرایط جریان آزاد مناسب و در جریان مستغرق با پذیرش خطای حداکثر ۱۲ درصدی قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی

جریان آزاد، جریان مستغرق، فلوم منشوری، کانال‌های آبیاری

مقدمه

طبیعی یا مصنوعی که در مسیر جریان قرار گیرد و روابط دبی و عمق جریان را در اطراف خود تثبیت کند سازه کنترل کننده جریان خواهد بود. در سازه‌های مختلف با توجه به شرایط فیزیکی خاص، روابط متفاوتی بین دبی و عمق جریان برقرار است و از این رو هر یک برای هدف‌هایی معین استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری

معمولا برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌های روباز شرایطی ایجاد می‌شود که تنها با اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و پایین‌دست مقطعی خاص بتوان دبی جریان را اندازه‌گیری کرد (ایجاد مقطع کنترل و وقوع عمق بحرانی در این مقطع). هر سازه

مورد نیاز در ساخت سایر فلوم‌ها، می‌توان دبی جریان را با دقت کافی در کانال‌ها اندازه‌گرفت. با نصب این پایه‌ها در محور مرکزی کف کانال‌ها فلوم‌هایی معروف به فلوم‌های CBF (Central Baffle Flumes) ایجاد می‌شود.

سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1992) برای اندازه‌گیری دبی جریان، از فلوم‌های دایره‌ای استفاده کردند که در آن‌ها یک پایه‌ استوانه‌ای به قطر d در داخل لوله افقی به قطر D نصب می‌شود (شکل ۱، الف). در این فلوم با اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست پایه‌ استوانه‌ای (H)، دبی جریان با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.421 \left(\frac{H}{B_c} \right)^{2.31} \quad (1)$$

که در آن،

$$B_c = D - d \text{ و } g = \text{شتاب ثقل زمین.}$$

این دو محقق محدودیت‌هایی را برای استفاده از رابطه ۱ اعلام کرده‌اند. این رابطه برای شرایط جریان آزاد و نیز برای شرایط جریان مستغرق پیشنهاد شده است.

فلوم‌های S-M را اولین بار سامانی و ماگالانز (Samani & Magalanez, 2000) ابداع کردند و آزمودند. در این فلوم‌ها دو نیم استوانه به قطر d در طرفین یک مقطع مستطیلی، برای ایجاد تنگ‌شدگی (به عنوان مقطع کنترل) نصب می‌گردد (شکل ۱، ب). این محققان، ناحیه تنگ‌شدگی را محل وقوع عمق بحرانی تشخیص دادند و رابطه ۲ را برای محاسبه دبی جریان به دست آوردند:

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.701 \left(\frac{H}{B_c} \right)^{1.59} \quad (2)$$

جریان در کانال وجود دارد مانند استفاده از سرریزها و فلوم‌ها که هر یک معایب و محاسن خاص خود را دارد. مثلاً نصب و حذف (در صورت نیاز) فلوم نیازمند کارهای مهندسی و اجرایی است و نصب سرریز و فلوم نیاز به دقت بالایی دارد.

تحقیقات متعددی درباره سازه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری جریان چه در لوله‌ها و چه در کانال‌ها در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است. بیش از یک و نیم قرن از شروع مطالعات تئوری و آزمایشگاهی در زمینه فلوم‌ها سپری می‌شود و تا به حال انواع مختلفی از این سازه توسط افراد مختلف معرفی و مشخصات سازه‌ای و هیدرولیکی آن‌ها تعیین شده است. اولین مطالعه تئوری و آزمایشگاهی در خصوص فلوم‌های با عمق بحرانی توسط بلانگر (Belanger, 1849) صورت گرفت. پس از او، بزین (Bazin, 1896) نیز مطالعاتی در این زمینه دارد.

پارشال فلوم در اوایل سال ۱۹۰۰ به عنوان سازه ساده و ارزان برای اندازه‌گیری جریان در آبراهه‌ها معرفی شد. محققان مختلفی در مورد دقت اندازه‌گیری پارشال فلوم و ضریب‌های تصحیح معادله دبی در این فلوم تحت شرایط استغراق مطالعه کرده‌اند ولی در انتها هیچ یک استفاده از این سازه را در شرایط استغراق توصیه نکرده است.

استفاده از پایه‌های قابل حمل که در محور مرکزی کف کانال نصب می‌شوند تا مقطع کنترل برای اندازه‌گیری جریان ایجاد کنند یکی از روش‌های مطمئن، کم هزینه و در عین حال ساده و پر کاربرد است. این پایه‌ها به سهولت نصب و راه‌اندازی می‌شوند، قابلیت حمل از نقطه‌ای به نقطه دیگر را دارند و مشکلات نصب غیردقیق، مانند آنچه در پارشال فلوم و سرریز دیده می‌شود، ندارند. با استفاده از این پایه‌ها ضمن حذف کارهای اجرایی

اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای...

استفاده از رابطه ۲ در شرایط هیدرولیکی معینی هم برای جریان آزاد و هم برای جریان مستغرق توصیه شده است.

که در آن، H و $B_c = B - d$ = عمق جریان در بالادست مقطع تنگ شده (چسبیده به نیم‌استوانه‌ها).

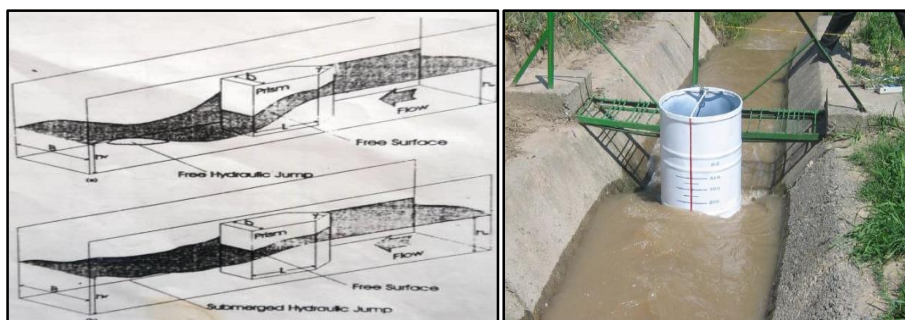


الف (a) شکل ۱- الف: فلوم دایره‌ای ب: فلوم S-M (سامانی و ماگالانز ۱۹۹۲)
Fig. 1- a; Circular flume b; S-M flume (Samani & Magalanez 1992)

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.226 \left(\frac{H}{B_c} \right)^{1.51} \quad (3)$$

پروچینلی و بوناسی (Peruginelli & Bonacci 1997) برای ایجاد مقطع کنترل در کانال‌های مستطیلی از پایه‌های منشوری، به جای پایه‌های استوانه‌ای، استفاده کردند (شکل ۲). آن‌ها با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی نمودارهایی را برای اندازه‌گیری جریان در کانال‌های مستطیلی ارائه کرده‌اند.

فلوم‌های دوزنقه‌ای با شیب جانبی $z=1$ را نیز سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) معرفی کردند و به کار گرفتند (شکل ۲الف). در این فلوم‌ها با نصب یک پایه استوانه‌ای در کف کانال دوزنقه‌ای، مقطع کنترل ایجاد می‌شود و دبی جریان از رابطه ۳ به دست می‌آید. این رابطه نیز هم برای جریان آزاد و هم برای جریان مستغرق پیشنهاد شده است.



الف (a) شکل ۲- الف: فلوم دوزنقه‌ای (تاجیکستان، Samani, 2016)، ب: پایه منشوری در کانال مستطیلی در حالت جریان آزاد و مستغرق (Peruginelli & Bonacci., 1997)

Fig. 2- a; Trapezoidal flume (Tajikistan, Samani 2016) b; Prismatic pier in rectangular canal in free & submerged flow condition (Peruginelly & Bonacci, 1997)

محمدی و وطن‌خواه & Mohammadi) (Vatankhah, 2020) با مطالعه نظری و آزمایشگاهی خصوصیات جریان عبوری از فلوم‌هایی با دیواره‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل در شرایط جریان آزاد، معادله‌هایی را برای تخمین دبی جریان در کانال‌های مستطیلی توسعه دادند. آن‌ها از سه فرم رابطه دبی - اشل استفاده و رابطه برتر را تعیین کردند. فرو (Ferro, 2016) با استفاده از تئوری باکینگهام و نظریه خود تشابه ناقص با نصب پایه منشوری در محور مرکزی کف کانال مستطیلی و در نتیجه ایجاد فلوم CBF، مطالعه آزمایشگاهی برای به‌دست آوردن رابطه محاسبه دبی جریان را انجام داد و اعلام کرد محاسبه دبی جریان با استفاده از این رابطه دارای خطای حداکثر شش درصد است. بیژن‌خان و فرو (Bijankhan & Ferro, 2019) پس از نصب پایه مثلثی با زاویه راس ۷۵ درجه در کف کانال مستطیلی و در نتیجه ایجاد فلوم موسوم به TCBF، با استفاده از تئوری باکینگهام و نظریه خود تشابه ناقص، رابطه محاسبه دبی جریان را بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه و خطای محاسبه دبی جریان با استفاده از این رابطه را چهار درصد گزارش کردند. کاپور و همکاران (Kapoor et al., 2019) بر اساس مفهوم انرژی، جریان اطراف پایه‌های مخروطی نصب شده در محور مرکزی کف کانال مستطیلی را بررسی و رابطه ارائه شده برای محاسبه دبی جریان را در چندین فلوم آزمایشگاهی ارزیابی کردند. حداکثر خطا در محاسبه دبی جریان را ۹ درصد گزارش دادند.

لطفی کولوانی و همکاران (Lotfi Kolavani et al., 2018) از تئوری باکینگهام و نظریه خود تشابه ناقص برای به‌دست آوردن منحنی دبی - اشل در

که در آن، $B_c = B + 2mH - D$ = عرض کف کانال؛ m = شیب وجه جانبی؛ D = قطر استوانه؛ و H = عمق جریان بلافاصله بالادست استوانه).

رابینسون (Robinson, 1968) معادله‌های دبی - اشل را در فلوم‌های دوزنقه‌ای با کفی منطبق بر کف کانال در شرایط جریان آزاد استخراج و ضریب‌های تصحیح دبی را برای جریان مستغرق ارائه کرد. مسعودیان و کردی (Masoudian & Kordi, 2005) روی فلوم رپلاگل تحقیق کردند و با بهره گرفتن از مبانی تئوریک، رابطه دبی - اشل را استخراج و با نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی مقایسه کردند. بادار و گاره (Badar & Ghare, 2014) بر اساس نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از تحقیقات دیگر محققان، مدل ریاضی محاسبه دبی جریان در کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ را با استفاده از نصب پایه‌های استوانه‌ای در محور مرکزی کف کانال توسعه دادند. پراباتا (Prabhata, 1998) نتایج حاصل از تحقیقات پروجینللی و بوناسی (Peruginelli & Bonacci, 1997) را بررسی و تجزیه تحلیل و روابط بهبود یافته‌تری در مورد سازه‌های منشوری ارائه داد. رابطه‌های ۴ و ۵ برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد توسط او به‌دست آمده است.

$$Q = \frac{2}{3} C_d (B - b + 0.132h_m) h_m \sqrt{2gh_m} \quad (4)$$

$$C_d = 0.5 \left(\frac{B - b}{b} \right)^{0.13} \quad (5)$$

که در آن، h_m = عمق جریان در بالادست پایه؛ B = عرض کف کانال مستطیلی؛ b = عرض پایه منشوری؛ و C_d = ضریب دبی جریان.

کانال‌های دوزنقه‌ای به مراتب بیشتر است تا کانال‌های دیگر، از جمله کانال‌های مستطیلی. از این رو، روشی مطمئن و ساده برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با اهمیت است. استفاده از پایه‌های منشوری برای اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های مستطیلی را محققانی چند بررسی کرده‌اند اما قابلیت این روش در کانال‌های دوزنقه‌ای بررسی نشده است. در این تحقیق، اندازه‌گیری دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با استفاده از پایه‌ها منشوری بررسی شده است. برای به‌دست آوردن روابط و نمودارهای محاسبه دبی جریان، بررسی‌های آزمایشگاهی روی پایه‌های منشوری صورت گرفت که در محور مرکزی کف کانال‌های دوزنقه‌ای نصب شده‌اند.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با طول ۶ متر، عرض کف ۴۶ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و با شیب جانبی و شیب کف قابل تنظیم در آزمایشگاه هیدرولیک صورت گرفت. کف این فلوم فلزی و دیواره‌های آن از جنس شیشه با چارچوب فلزی است. دریچه‌ای در انتهای فلوم برای کنترل سطح آب پایین‌دست پایه منشوری، نصب شده است. دبی جریان به روش حجمی با مخزنی اندازه‌گیری می‌شود که در انتهای فلوم قرار داده شده است؛ برای اندازه‌گیری عمق جریان در کانال از عمق سنجی با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر استفاده شد.

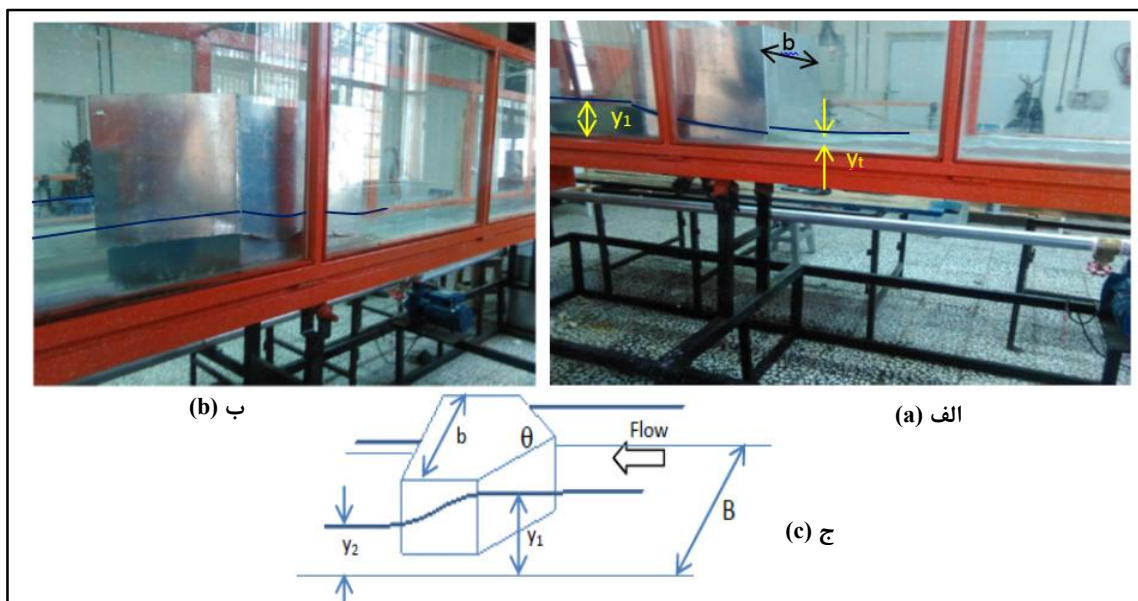
پایه‌های منشوری در ۴ عرض (۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۶ سانتی‌متر) ساخته شده‌اند. طول پایه‌ها مساوی عرض آن‌ها، ارتفاع هر ۴ پایه ۴۰ سانتی‌متر و زاویه راس تمامی پایه‌ها ۹۰ درجه در نظر گرفته شدند (شکل ۳).

فلوم‌های CBF دایره‌ای استفاده و منحنی به‌دست آمده را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در محدوده‌ای وسیع از نسبت‌های تنگ‌شدگی کالیبره کردند و به این نتیجه رسیدند که نسبت تنگ‌شدگی که تاکنون در رابطه تابعی آنالیز ابعادی در نظر گرفته نمی‌شد، منحنی دبی-اشل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این محققان همچنین تاثیر شیب طولی فلوم در منحنی دبی-اشل را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بررسی کردند.

بادار و گاره (Badar & Ghare, 2012) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از تحقیقات سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) (که فلوم‌های CBF دوزنقه‌ای با پایه‌های استوانه‌ای را بررسی کرده‌اند)، گروه‌های مختلف بدون بعد دبی و اشل را بررسی و رابطه‌ای برای محاسبه دبی جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ (به‌جز رابطه ارائه شده توسط محقق مربوط) به‌دست آورند. گاره و همکاران (Ghare et al., 2020) اندازه‌گیری جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای را با استفاده از فلوم‌های CBF با پایه‌های استوانه‌ای در شرایط جریان آزاد بررسی کردند و بر اساس آنالیز ابعادی، چهار گروه بدون بعد را برای دستیابی به رابطه محاسبه دبی جریان مد نظر قرار دادند. شیب‌های جانبی بررسی شده در تحقیقات آن‌ها $z=0/5$ تا $z=2$ با فاصله‌های $0/25$ هستند. یکی از رابطه‌هایی که توسط آن‌ها به‌دست آمده رابطه ۶ است.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB^5}} = 0.27z^{0.47} \left(\frac{y}{D} \right)^2 \quad (6)$$

که در آن، D = قطر پایه استوانه‌ای؛ و B = عرض کف کانال. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کاربرد



شکل ۳- الف و ب: به ترتیب وجه پایین دست و بالادست پایه منشوری حین آزمایش (جریان آزاد) ج: شکل شماتیک پایه منشوری نصب شده در کف کانال

Fig. 3- a & b; Downstream & upstream side of prismatic pier in experimenting respectively (free flow condition) c; Schematic fig. of prismatic pier installed on the floor of canal.

بدون بعد ۹ و ۱۰ به ترتیب برای شرایط جریان آزاد (پرش هیدرولیکی آزاد در پایین دست پایه منشوری) و مستغرق (پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین دست پایه منشوری) به دست می آیند. در رابطه ۱۰ پارامتر بی بعد y_1/y_2 از تقسیم پارامتر بی بعد y_1/B_c بر پارامتر بی بعد y_2/B_c به دست آمده است. در شرایط جریان مستغرق y_1 و B_c تحت تاثیر y_2 هستند.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = f\left(\frac{y_1}{B_c}\right) \quad (9)$$

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = f\left(\frac{y_1}{B_c}, \frac{y_2}{y_1}\right) \quad (10)$$

مراحل اجرای آزمایشها

با تنظیم شیب جانبی کانال در شیبی معین، آزمایشها روی هر ۴ پایه منشوری شکل با مشخصات ذکر شده، هم در شرایط جریان آزاد (پرش هیدرولیکی آزاد) و هم در شرایط جریان

روابط بی بعد محاسبه دبی جریان

در این تحقیق عوامل موثر در محاسبه دبی جریان در کانالهای دوزنقه‌ای به صورت رابطه تابعی γ ارائه شده است.

$$f(B, b, y_1, y_2, z, g, \mu, \rho, Q, \sigma) = 0 \quad (7)$$

که در آن،

B = عرض کف کانال؛ b = عرض پایه منشوری؛ y_1 = عمق جریان در بالادست پایه منشوری؛ y_2 = عمق پایاب؛ z = شیب جانبی کانال؛ g = شتاب ثقل زمین؛ ρ = جرم حجمی آب؛ μ = ویسکوزیته دینامیک آب؛ Q = دبی جریان؛ σ = ضریب نیروی کشش سطحی. رابطه تابعی γ را می توان به شکل زیر نیز نوشت.

$$f(B_c, y_1, y_2, g, \mu, \rho, Q, \sigma) = 0 \quad (8)$$

که در آن،

$$B_c = B + 2zy_1 - b$$

با استفاده از آنالیز ابعادی و پس از حذف پارامترها و نسبت های بی بعد بدون تاثیر، رابطه تابعی

برای هر پایه منشوری در شیب جانبی معین ۱۸ آزمایش (۳×۶ آزمایش) اجرا شد. با توجه به اینکه آزمایش‌ها برای ۴ پایه منشوری اجرا شدند، از این رو در یک شیب جانبی تعداد آزمایش‌ها به ۷۲ (۱۸×۴) می‌رسد.

آزمایش‌ها برای ۴ شیب جانبی $z=0.7(\alpha=55^\circ)$ ، $z=0.4663(\alpha=65^\circ)$ ، $z=0.268(\alpha=75^\circ)$ و $z=1(\alpha=45^\circ)$ صورت گرفت که α زاویه وجه جانبی کانال با افق است. بنابراین ۹۶ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۲۸۸ آزمایش در شرایط جریان مستغرق اجرا شد. حد بالا و پایین پارامترهای مورد نیاز در آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

مستغرق (پرش هیدرولیکی مستغرق) اجرا شدند. در هر آزمایش (به ازای یک دبی ثابت) پارامترهای مورد نیاز یعنی دبی جریان (Q)، عمق جریان در بالادست پایه منشوری (y_1) و عمق جریان در پایین دست پایه منشوری (y_2) اندازه‌گیری شد.

در شرایط جریان آزاد در شیب جانبی معین، ۶ آزمایش برای هر پایه منشوری اجرا شد. یعنی ۲۴ آزمایش در شرایط جریان آزاد در یک شیب جانبی معین (برای ۴ پایه) صورت گرفت. در شرایط جریان مستغرق برای هر پایه منشوری در شیب جانبی مشخص، به ازای دبی معین، با تنظیم دریچه انتهایی کانال، ۳ درجه استغراق در نظر گرفته شد. بنابراین

جدول ۱- حد بالا و پایین پارامترهای مورد نیاز در آزمایش‌ها

Table 1- Upper and lower limit of required parameters in experiments

Submerged flow conditions				Free flow conditions				y_1/B_c	y_1/y_1	z	b/B	پارامتر Parameter
Fr_2	Fr_1	$V_2(m/s)$	$V_1(m/s)$	Fr_2	Fr_1	$V_2(m/s)$	$V_1(m/s)$					
0.028	0.022	0.02	0.016	0.72	0.05	0.24	0.016	0.26	0.2	0.268	0.78	حد پایین Lower limit
0.56	0.15	0.3	0.12	1.4	0.15	1.1	0.12	1.27	0.8	1	0.91	حد بالا Upper limit

اندیس ۱ مربوط به بالادست و اندیس ۲ مربوط به پایین دست پایه منشوری

در برابر y_1/B_c در شیب‌های جانبی مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که از نمودارهای شکل ۴ مشخص است، با کاهش زاویه وجه جانبی کانال با افق (α) و یا افزایش z ، مقادیر توان پارامتر بی بعد y_1/B_c افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، حساسیت این سازه اندازه‌گیری دبی نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست پایه منشوری (y_1)، با افزایش z افزایش پیدا کرده است. مقادیر توان و ضریب پارامتر بی بعد y_1/B_c برای شیب‌های جانبی مختلف در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

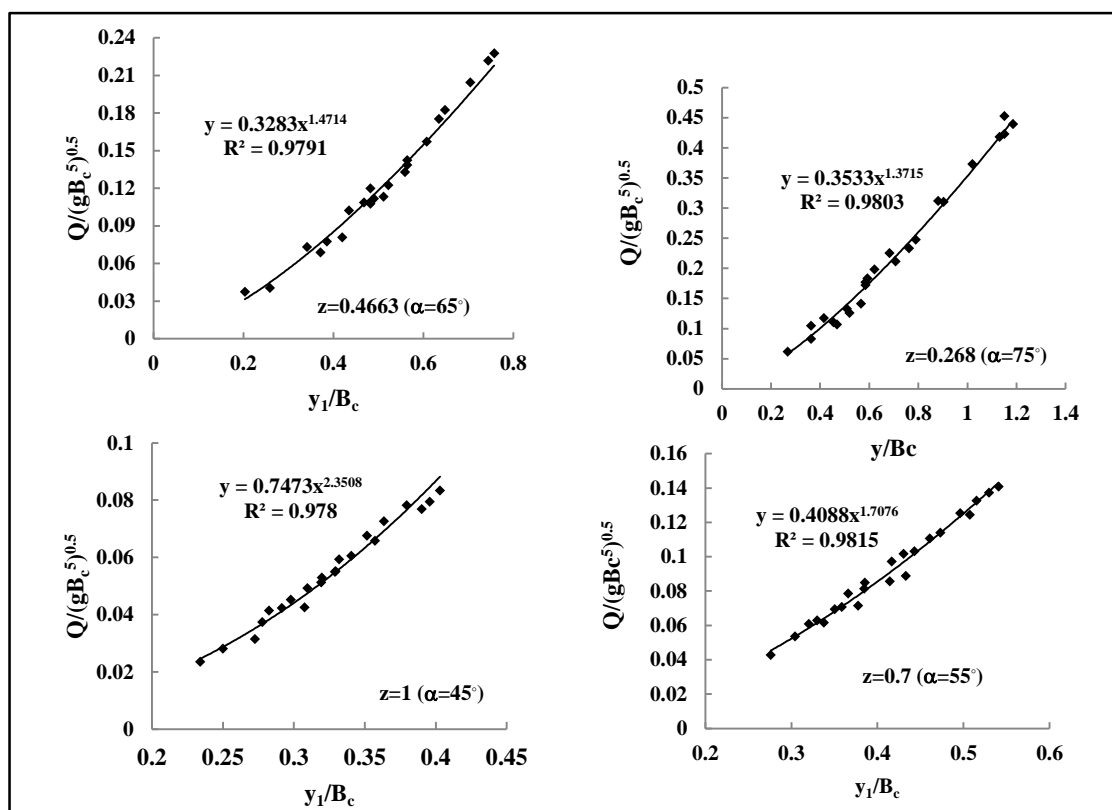
نتایج و بحث

آزمایش‌ها در دو حالت جریان آزاد و مستغرق همانند تحقیقات پروچینلی و بوناسی (Peruginelli & Bonacci, 1997) و بادار و گاره (Badar & Ghare, 2014) اجرا شدند.

جریان آزاد و مستغرق (پرش هیدرولیکی

آزاد و مستغرق در پایین دست پایه منشوری):

بر اساس رابطه ۹ آزمایش‌ها در شرایط جریان آزاد در چهار شیب جانبی مختلف برای تمامی پایه‌های منشوری اجرا شدند. تغییرات $Q/(gB_c^5)^{0.5}$



شکل ۴- تغییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در چهار شیب جانبی در شرایط جریان آزاد
 Fig. 4- Variation of y_1/B_c vs. $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ for 4 side slopes in free flow conditions

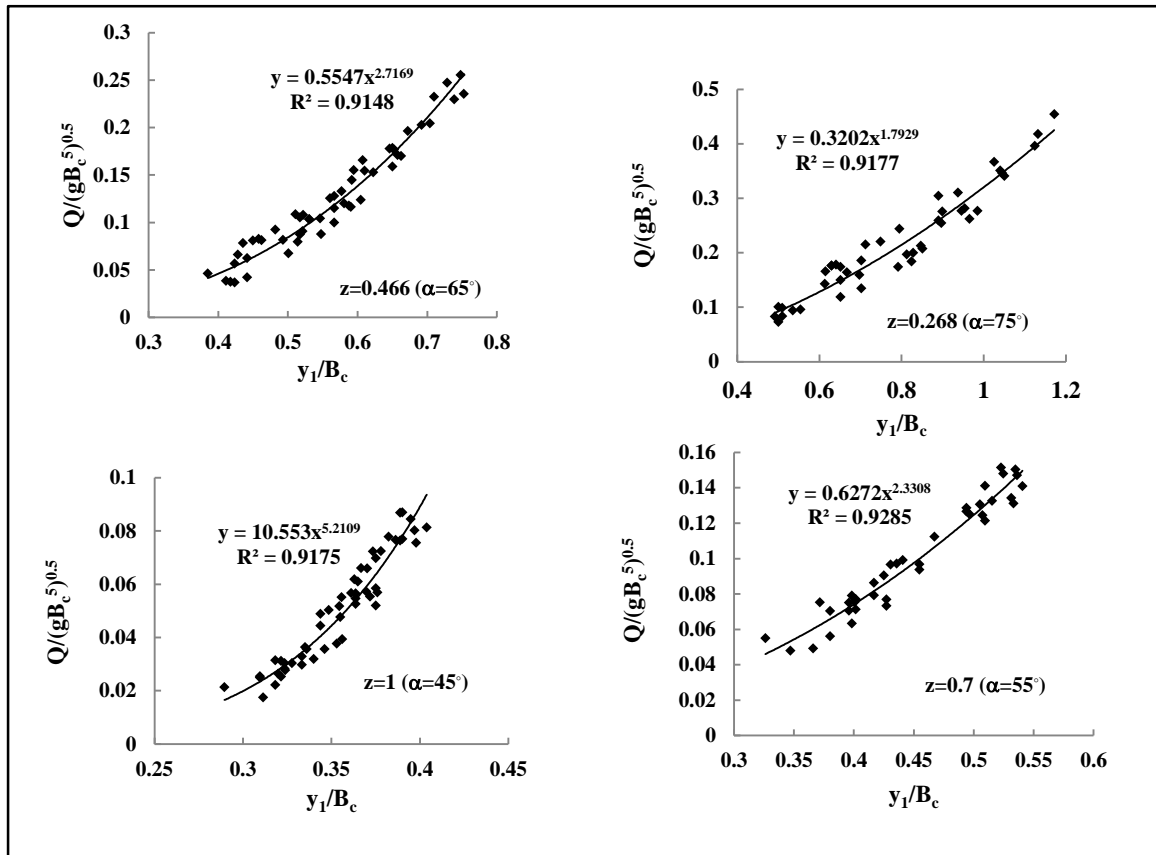
جدول ۲- مقادیر توان و ضریب پارامتر بی بعد y_1/B_c برای شیب‌های جانبی مختلف

Table 2- Exponent and coefficient values of y_1/B_c in different side slopes

1	0.7	0.4663	0.268	شیب وجه جانبی (side slope, z)
2.3508	1.7076	1.4714	1.3715	توان (exponent)
0.7473	0.4088	0.3283	0.3533	ضریب (coefficient)

در شرایط جریان مستغرق با شرایط جریان آزاد متفاوت است. بنابراین، در روابط و نمودارهای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان مستغرق، تاثیر عمق پایاب در عمق بالادست پایه منشوری مستتر است. با توجه به نمودارهای شکل ۵ مشخص می‌شود که دقت محاسبه دبی جریان در حالت جریان مستغرق در پایین دست گلوگاه نسبت به حالت جریان‌های آزاد نسبتاً پایین تر است و ضریب‌ها و توان‌های پارامتر بدون بعد y_1/B_c از روند مشخصی تبعیت نکرده‌اند.

در شرایط جریان مستغرق، تغییرات $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در برابر y_1/B_c در شیب‌های جانبی مختلف بر اساس رابطه ۱۰ در شکل ۵ ارائه شده است. محدوده درجه استغراق (y_1/y_2) در آزمایش‌ها حداقل ۲۲ و حداکثر ۸۰ درصد است. در شرایط جریان مستغرق، عمق بالادست پایه منشوری (y_1) و B_c تحت تاثیر عمق پایاب (y_2) قرار دارد. بنابراین، در این شرایط برای به دست آوردن روابط و نمودارها از عمق بالادست و B_c متناظرش که از y_2 متاثر شده‌اند استفاده شده است. به ازای دبی معین، عمق بالادست پایه منشوری



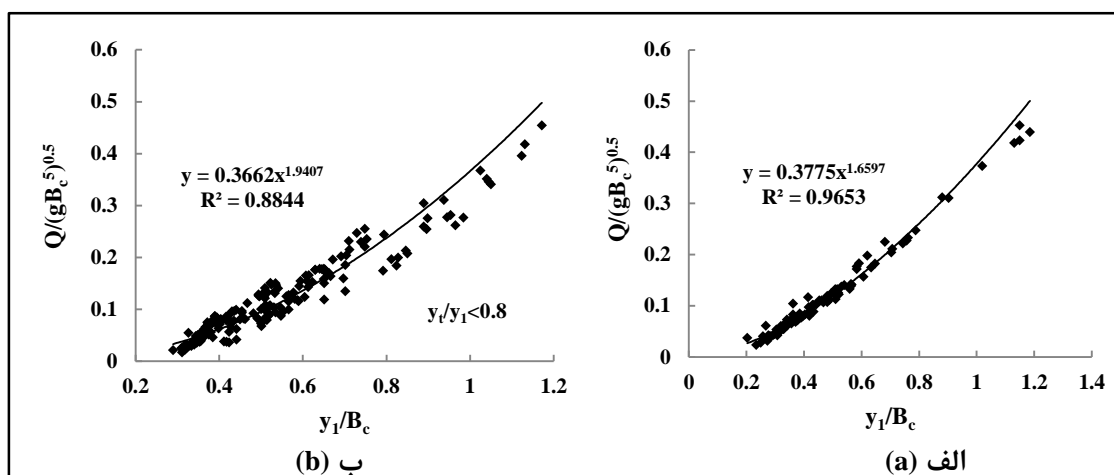
شکل ۵- تغییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در چهار شیب جانبی در شرایط جریان مستغرق
 Fig. 5- Variation of y_1/B_c vs. $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ for 4 side slopes in submerged flow conditions

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.3662 \left(\frac{y_1}{B_c} \right)^{1.9407} \quad (12)$$

با مقایسه ضریب‌های به‌دست آمده در این تحقیق با ضریب‌های به‌دست آمده در تحقیق سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) برای فلوم‌های دایره‌ای، فلوم‌های S-M و فلوم‌های دوزنقه‌ای (روابط ۱، ۲ و ۳) مشخص می‌گردد که حساسیت فلوم‌های مورد بررسی در این تحقیق نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست گلوگاه (توان y_1) در مقایسه با فلوم‌های دوزنقه‌ای و S-M، بالا و در مقایسه با فلوم‌های دایره‌ای پایین‌تر است.

تغییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ برای هر چهار شیب جانبی بر اساس نتایج حاصل از ۹۶ آزمایش در شرایط جریان آزاد و ۲۸۸ آزمایش در شرایط جریان مستغرق، در قالب نمودار و رابطه‌ای واحد در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶ الف از همپوشانی نمودارهای شکل ۴ و شکل ۶ ب از همپوشانی نمودارهای شکل ۵ به‌دست آمده است. برای هر شیب جانبی در محدوده شیب‌های جانبی آزمایشی روابط ۱۱ و ۱۲ برای تعیین دبی به ترتیب برای شرایط جریان آزاد و مستغرق به‌دست آمده‌اند.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.3775 \left(\frac{y_1}{B_c} \right)^{1.6597} \quad (11)$$



شکل ۶- تغییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ برای شیب‌های جانبی مختلف الف: جریان آزاد ب: جریان مستغرق
 Fig. 6- Variation of y_1/B_c vs. $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ for different side slopes, a; free flow b; submerged flow

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.3553 \left(\frac{y_1}{B_c} \right)^{1.7846} \quad (13)$$

برای ارزیابی دقت روابط به‌دست آمده از توابع آماری حداکثر خطا (ME)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای نسبی (MARE) استفاده شده است.

$$ME = \text{Max}|x_i - y_i| \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (15)$$

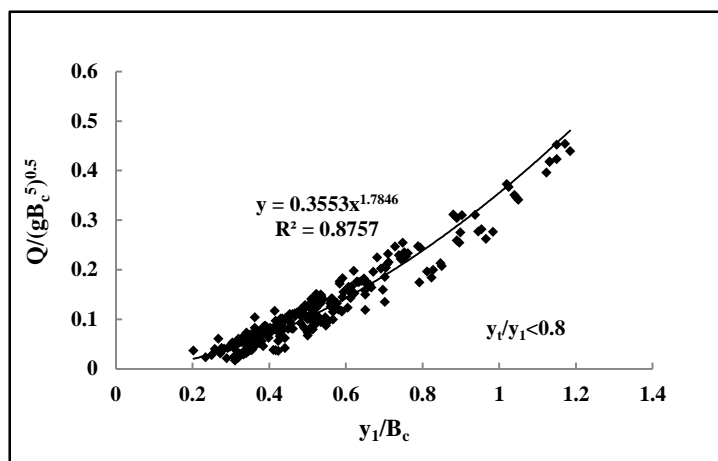
$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (16)$$

که در آنها، x_i و y_i به ترتیب مقدار مشاهده شده و محاسبه شده پارامتر مورد نظر؛ و n = تعداد مشاهدات. مقادیر محاسبه شده توابع آماری فوق برای محاسبه پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در شیب‌های جانبی مختلف برای شرایط جریان آزاد و مستغرق در جدول ۲ و بر اساس رابطه ۱۳ در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ دیده می‌شود که در هر شیب جانبی مقادیر هر سه پارامتر آماری، در شرایط جریان آزاد

البته در رابطه ارائه شده توسط سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) برای فلوم‌های دایره‌ای (رابطه ۱)، $B_c = D-d$ است که عمق جریان بالادست گلوگاه (y_1) در محاسبه B_c بی‌تاثیر است. در حالیکه در رابطه به‌دست آمده در این تحقیق، عمق جریان بالادست گلوگاه در محاسبه B_c موثر است که حساسیت فلوم بررسی شده را نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت حساسیت فلوم‌های مورد بررسی در این تحقیق نسبت به تغییرات عمق جریان در بالادست گلوگاه در مقایسه با فلوم‌های دایره‌ای (شکل ۱ الف) نیز بالاست.

رابطه ارائه شده توسط پراباتا (رابطه ۴) که برای کانال‌های مستطیلی به‌دست آمده، رابطه‌ای با توان ۲/۵ نسبت به عمق جریان در بالادست گلوگاه است که در مقایسه با رابطه به‌دست آمده در این بررسی پایین‌تر است. در شکل ۷ رابطه کلی برای محاسبه دبی هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق نشان داده شده است. این شکل از همپوشانی شکل‌های ۶ الف و ب حاصل شده و این رابطه (رابطه ۱۳)، در شرایط $y_1/y_1 < 0.8$ به‌دست آمده است.



شکل ۷- تعییرات y_1/B_c در برابر $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در شیب‌های جانبی مختلف برای هر دو جریان آزاد و مستغرق
 Fig. 7- Variation of y_1/B_c vs. $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ in different side slopes for both free and submerged flow

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ME، RMSE و MARE در شیب‌های جانبی مختلف برای شرایط جریان آزاد و مستغرق

Table 2- values of ME, RMSE and MARE in different side slopes for free and submerged flow conditions

جریان مستغرق (submerged flow)			جریان آزاد (free flow)			شیب جانبی (side slope)
MARE	RMSE	ME	MARE	RMSE	ME	z (α°)
0.11	0.024	0.045	0.063	0.012	0.024	0.268 (75°)
0.12	0.012	0.022	0.055	0.006	0.01	0.4663 (65°)
0.073	0.007	0.013	0.033	0.004	0.009	0.7 (55°)
0.11	0.005	0.012	0.041	0.003	0.005	1 (45°)
0.102	0.014	0.047	0.083	0.014	0.06	All side slopes (equation 11 and 12)

جدول ۳- پارامترهای آماری برای شیب‌های جانبی مختلف بر اساس رابطه ۱۳

Table 3- Statistical parameters for side slopes based on equation 13

MARE	RMSE	ME	وضعیت جریان Flow condition
0.19	0.022	0.07	$y_1/y_1 < 0.8$

محاسبه پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ در شرایط جریان آزاد حداکثر ۰/۰۶۳ یا ۶/۳ درصد در شیب جانبی $z=0/268$ و در شرایط جریان مستغرق حداکثر ۰/۱۲ یا ۱۲ درصد در شیب جانبی $z=0/4663$ حاصل شده است که حاکی از دقت مناسب در شرایط جریان آزاد و دقت نسبتاً مناسب در شرایط جریان مستغرق است.

در حالت کلی، در محاسبه پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ (روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب مربوط به شرایط جریان آزاد و مستغرق) مقدار به‌دست آمده

کمتر است تا در شرایط جریان مستغرق. به سخی دیگر، دقت محاسبه دبی در شرایط جریان آزاد بالاتر از دقت محاسبه دبی در شرایط جریان مستغرق است. در شرایط جریان آزاد، مقدار پارامتر آماری حداکثر خطای مطلق (ME) در کلیه شیب‌ها کمتر از ۰/۰۲۴ است و در شرایط جریان مستغرق حداکثر ۰/۰۴۵ در شیب جانبی $z=0/268$ است که بیان‌کننده دقت نسبتاً مناسب در برآورد دبی جریان با استفاده از روابط به‌دست آمده برای هر شیب جانبی است. درصد متوسط خطای نسبی (MARE) در

نسبتاً پایین‌تر است (شکل ۸ ب). تطابق پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ آزمایشگاهی و محاسباتی (با استفاده از رابطه ۱۳ که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق به‌دست آمده) کمتر از دو حالت قبلی است (شکل ۹).

مقایسه با سایر تحقیقات

نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، با نتایج بدست آمده در سایر تحقیقات مقایسه شد. گاره و همکاران (Ghare *et al.*, 2020) آزمایش‌هایی را روی فلوم‌هایی ذوزنقه‌ای با استوانه مرکزی اجرا و پس از بررسی گروه‌های بی‌بعد مختلف، چندین رابطه برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد ارائه دادند.

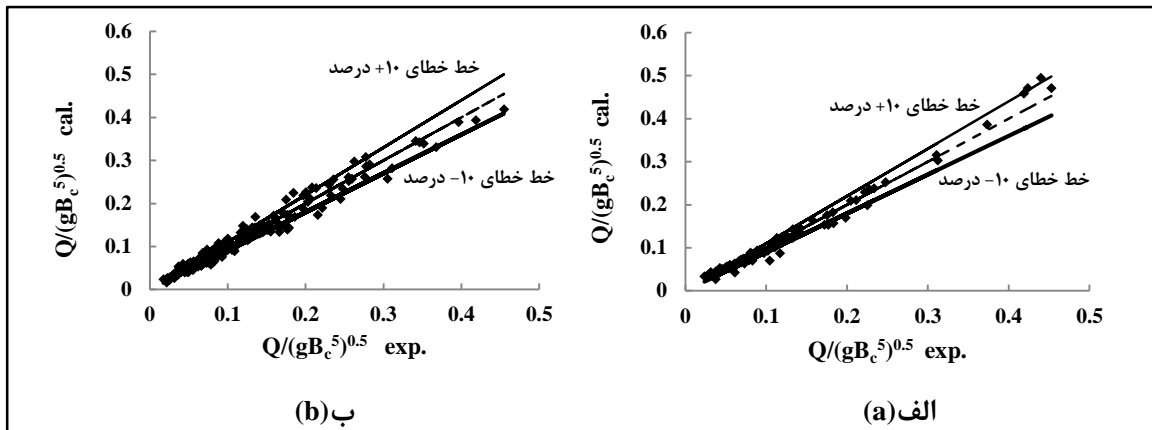
یکی از روابط ارائه شده توسط این محققان رابطه ۶ است. نتایج محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه ۶، با روابط ارائه شده در شکل ۴ و رابطه ۱۱ برای شیب جانبی 0.268 و $z=0.4663$ مقایسه و نتایج این مقایسه در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در محاسبه دبی با استفاده از رابطه ۶ به‌جای d (قطر استوانه) از b (عرض پایه منشوری) استفاده شده است. از روی این جدول‌ها و نمودارها مشخص است استفاده از روابط محاسبه دبی جریان مربوط به هر شیب جانبی، نسبت به استفاده از یک رابطه برای تمام شیب‌های جانبی، خطای کمتری دارد.

سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) با نصب پایه استوانه‌ای در محور مرکزی کف کانال ذوزنقه‌ای، پس از آزمایش‌های متعدد، رابطه محاسبه دبی جریان را به‌دست آوردند که هم برای شرایط جریان آزاد به‌کار می‌رود و هم برای شرایط جریان مستغرق (رابطه ۳).

برای پارامتر آماری ME در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب 0.06 و 0.47 و برای پارامتر آماری MARE به ترتیب $8/3$ و $10/2$ درصد است. بنابراین، رابطه ۱۰ که برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد به‌دست آمده، دارای دقت مناسب است و رابطه ۱۱ که برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان مستغرق (با درجه استغراق حداکثر ۸۰ درصد) است، نسبت به رابطه ۱۰ دقت نسبتاً پایین‌تری دارد.

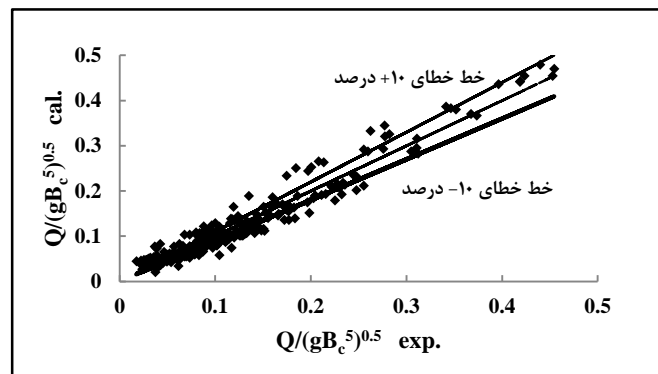
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، متوسط قدر مطلق خطای نسبی در برآورد پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ معادل ۱۹ درصد، مقداری بالا است. بنابراین، بر خلاف رابطه ارائه شده توسط سامانی و ماگالانز (Samani & Magallanez, 1993) (روابط ۱، ۲ و ۳) برای فلوم‌های دایره‌ای، S-M و ذوزنقه‌ای که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق پیشنهاد شده، استفاده از رابطه‌ای واحد برای برآورد دبی جریان هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق مناسب تشخیص داده نمی‌شود و بهتر است از رابطه جداگانه مربوط به شرایط جریان آزاد و مستغرق استفاده شود.

مقایسه پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ محاسبه شده توسط روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ و اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت در شرایط جریان آزاد، پارامتر بی‌بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ آزمایشگاهی و محاسباتی (با استفاده از رابطه ۱۱) از تطابق بالایی برخوردارند (شکل ۸ الف)، اما در شرایط جریان مستغرق این تطابق نسبت به شرایط جریان آزاد



شکل ۸- مقایسه پارامتر بی بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ اندازه گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه شده، الف: جریان آزاد (رابطه ۱۱) ب: جریان مستغرق (رابطه ۱۲)

Fig. 8- Comparison of experimental and calculated $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ a; free flow (equation 11) b; submerged flow (equation 12)



شکل ۹- مقایسه پارامتر بی بعد $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ اندازه گیری شده (آزمایشگاهی) و محاسبه شده بر اساس رابطه ۱۳

Fig. 9- Comparison of experimental and calculated $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ based on equation 13

دوزنقه‌ای آزمایشگاهی (با شیب جانبی قابل تنظیم) هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق اجرا شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، ابتدا برای هر کانال با شیب جانبی معین، رابطه‌ای برای محاسبه دبی جریان هم در شرایط جریان آزاد و هم در شرایط جریان مستغرق، به دست آمد. به منظور تعیین دبی جریان برای تمامی شیب‌های جانبی مورد بررسی یک رابطه برای جریان آزاد و یک رابطه برای جریان مستغرق استخراج شد. سرانجام رابطه‌ای واحد برای محاسبه دبی جریان، که برای هر دو شرایط جریان آزاد و مستغرق استفاده شود، به دست آمد.

اما در این تحقیق روابط جداگانه‌ای برای محاسبه دبی جریان در شرایط جریان آزاد و مستغرق به دست آمده، بنابراین نمی‌توان نتایج این تحقیق را با نتایج تحقیقات سامانی مقایسه کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی امکان اندازه‌گیری جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای با استفاده از نصب پایه‌های منشوری در محور مرکزی کف کانال و ایجاد مقطع تنگ‌شده با نسبت‌های مختلف به عنوان مقطع کنترل، آزمایش‌های متعددی با جریان زیر بحرانی در یک کانال

جدول ۴- مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با دبی‌های محاسبه شده با استفاده از رابطه ۶ (رابطه ارائه شده توسط Ghare, 2020) و روابط به‌دست آمده از این تحقیق برای شیب جانبی $z=0.268$

Table 4- Comparison of observed discharge with the equation 6 and obtained equations in this research for side slope $z= 0.268$

b (cm)	y_1 (mm)	Q (m ³ /s) obs.	Q (m ³ /s) (from fig. 4)	Q (m ³ /s) Eq. 11	Q (m ³ /s) Ghare 2020, Eq. 6	Absolute Relative Error		
						fig. 4	Eq. 11	Ghare, 2020
42	130	0.005487	0.005566	0.005243	0.006262	0.054592	0.051766	0.070277
	120	0.004985	0.004713	0.006246	0.005336	0.014295	0.138181	0.141125
	115	0.004317	0.004317	0.004780	0.004900	0.000122	0.107346	0.135190
	120	0.004660	0.004713	0.005243	0.005336	0.011344	0.125120	0.144923
	90	0.002704	0.002630	0.002826	0.003001	0.027409	0.045143	0.110012
	34	0.000441	0.000433	0.000396	0.000428	0.018113	0.101528	0.028332
40	105	0.004485	0.004436	0.004602	0.004504	0.010921	0.026201	0.004255
	100	0.004252	0.004041	0.004162	0.004085	0.049613	0.021156	0.039220
	82	0.002702	0.002785	0.002779	0.002747	0.030410	0.028237	0.016399
	52	0.001314	0.001233	0.001133	0.001105	0.061073	0.137539	0.159142
	32	0.000606	0.000547	0.000454	0.000418	0.097202	0.251460	0.309881
	27	0.000495	0.000417	0.000332	0.000298	0.157998	0.328421	0.397996
38	103	0.004915	0.005122	0.005060	0.004802	0.042090	0.029493	0.022970
	91	0.003936	0.004090	0.003954	0.003748	0.039137	0.004587	0.047747
	86	0.003881	0.003696	0.003537	0.003348	0.071432	0.111439	0.159040
	65	0.001975	0.002266	0.002055	0.001912	0.147058	0.040211	0.031817
	50	0.001246	0.001457	0.001251	0.001132	0.168626	0.003362	0.092166
	25	0.000511	0.000484	0.000354	0.000283	0.053806	0.308510	0.446879
36	93	0.005399	0.005000	0.004656	0.004362	0.073823	0.137495	0.192028
	85	0.004479	0.004277	0.003914	0.003644	0.044952	0.126087	0.186411
	72	0.002812	0.003223	0.002851	0.002614	0.146144	0.014021	0.070275
	70	0.002716	0.003074	0.002704	0.002471	0.054248	0.072751	0.152433
	60	0.002200	0.002379	0.002024	0.001816	0.081261	0.079835	0.174779
	45	0.001410	0.001494	0.001191	0.001021	0.059325	0.155085	0.275721
Mean						0.063125	0.101874	0.142042

جدول ۵- مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با دبی‌های محاسبه شده با استفاده از رابطه ۶ (رابطه ارائه شده توسط Ghare 2020) و روابط به‌دست آمده از این تحقیق برای شیب جانبی $z=0.4663$

Table 5- Comparison of observed discharge with the equation 6 and obtained equations in this research for side slope $z= 0.4663$

b (cm)	y ₁ (mm)	Q (m ³ /s) obs.	Q (m ³ /s) (from fig. 4)	Q (m ³ /s) Eq. 11	Q (m ³ /s) Ghare 2020, Eq. 6	Absolute Relative Error		
						fig. 4	Eq. 11	Ghare, 2020
42	103	0.004865	0.004662	0.005087	0.005100	0.041857	0.045475	0.048166
	97	0.004269	0.004087	0.004445	0.004523	0.042647	0.041074	0.059384
	82	0.002962	0.002841	0.003057	0.003232	0.041076	0.032122	0.091108
	35	0.000533	0.000499	0.000500	0.000589	0.063242	0.061226	0.104516
40	98	0.005092	0.004836	0.005123	0.005090	0.050401	0.006050	0.000505
	93	0.004526	0.004335	0.004575	0.004584	0.042038	0.010888	0.012842
	84	0.003504	0.003513	0.003677	0.003739	0.002398	0.049273	0.067040
	70	0.002312	0.002426	0.002500	0.002597	0.049394	0.081394	0.123335
	61	0.001789	0.001845	0.001877	0.001972	0.031474	0.049351	0.102589
	34	0.000549	0.000608	0.000580	0.000613	0.108404	0.057304	0.116462
38	95	0.005202	0.005160	0.005326	0.005300	0.008077	0.023796	0.018727
	93	0.005063	0.005160	0.005326	0.005300	0.019297	0.052050	0.046841
	78	0.003231	0.003488	0.003534	0.003573	0.079350	0.093579	0.105591
	70	0.002708	0.002825	0.002831	0.002877	0.043063	0.045308	0.062359
	55	0.001578	0.001785	0.001743	0.001776	0.131621	0.104568	0.125969
	20	0.000356	0.000300	0.000256	0.000235	0.156564	0.281888	0.340321
36	90	0.005076	0.005212	0.005238	0.005300	0.026777	0.031978	0.044029
	83	0.004504	0.004458	0.004443	0.004507	0.010227	0.013577	0.000753
	73	0.003703	0.003491	0.003431	0.003487	0.057184	0.073443	0.058394
	60	0.002331	0.002422	0.002327	0.002355	0.039128	0.001844	0.010492
	50	0.001886	0.001738	0.001632	0.001636	0.078158	0.134397	0.132618
	34	0.000796	0.000883	0.000786	0.000756	0.109023	0.011809	0.049611
Mean						0.055973	0.059200	0.078257

زیر بحرانی در کانال‌های دوزنقه‌ای با استفاده از نصب پایه‌های منشوری در محور مرکزی کف کانال برای شرایط جریان آزاد کاملاً مناسب و برای شرایط جریان مستغرق نسبتاً مناسب تشخیص داده شد (در صورت استفاده از رابطه تعیین دبی مختص یک شیب جانبی معین و نیز در صورت استفاده از رابطه‌ای واحد برای تعیین دبی در تمامی شیب‌های جانبی). محاسبه دبی جریان با استفاده از رابطه‌ای واحد که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق به کار رود مناسب نیست. استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر در محدوده پارامترهای مورد بررسی پیشنهاد می‌گردد.

متوسط خطای نسبی (MARE) برای تعیین دبی جریان در هر کانال با شیب جانبی ثابت در شرایط جریان آزاد حداکثر ۶/۳ درصد و در شرایط جریان مستغرق حداکثر ۱۲ درصد به‌دست آمده است. مقدار پارامتر آماری فوق در برآورد دبی جریان با استفاده از رابطه‌ای واحد برای کلیه شیب‌های جانبی بررسی شده، ۸/۳ و ۱۰/۲ درصد به ترتیب برای جریان آزاد و مستغرق تعیین شده است. برای تعیین دبی جریان با استفاده از رابطه‌ای که هم برای شرایط جریان آزاد و هم برای شرایط جریان مستغرق حاصل شده، مقدار متوسط خطای نسبی ۱۹ درصد به‌دست آمده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، اندازه‌گیری دبی جریان

مراجع

- Badar, A. M. & Ghare, A. D. (2012). Development of discharge prediction model for trapezoidal canals using simple portable flume. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(5), 37-42.
- Badar, A. M. & Ghare, A. D. (2014). Experimental studies on the use of mobile cylinders for measurement of flow through rectangular channels. *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 504-512.
- Bijankhan, M. & Ferro, V. (2019). Experimental study on triangular central baffle flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70, 101641.
- Clemmens, A. J., Bos, M. G. & Replogle, J. A. (1993). FLUME, Design and Calibration of Long-Throated Measuring Flumes. *International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen*, 117 pp.
- Clemmens, A. J., Wahl, T L, Bos, M. G. & Replogle, J. A. (2001). Water measurement with flumes and weirs. *International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen*, 384 pp.
- Davis, S. & Samani, Z. (2016). Simple Flow Measurement Devices for Open Channels. *New Mexico Water Resources Research Institute*. 52 pp.
- Ferro, V. (2016). Simple flume with a central baffle. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 53-56.
- Ghare, A. D., Kapoor, A. & Badar, A. M. (2020). Cylindrical central baffle flume for flow measurements in open channels. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 146(9), 06020007.
- Kapoor, A., Ghare, A. D., Vasudeo, A. D. & Badar, A. M. (2019). Channel flow measurement using portable conical central baffle. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 06019010.

- Lotfi Kolavani F., Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V, & Mahdavi Mazdeh, A. (2018). Flow measurement using circular portable flume. *Flow Measurement and Instrumentation*, 62,76-83.
- Masoudian, M. & Kordi, E. (2005). Determination of discharge rate in canals by Replogle flume. *Journal of Agriculture Science and Natural Resources*, 12(2),11-20. (in Persian)
- Mohammadi, M. & Vatankhah, A. (2020). Flow measurement flume with cylindrical and conical walls. *Iranian soil and water researches*, 51(7), 1637-1651. (in Persian)
- Peruginelli, A. & Bonacci, F. (1997). Mobile prisms for flow measurement in rectangular channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(3),170-174.
- Prabhata, K. S. (1998). Discussion of “Mobile prisms for flow measurement in rectangular channels” by Peruginelli, A. and Bonacci, F. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(5),279-280.
- Robinson, A. R. (1968). Trapezoidal flumes for measuring flow in irrigation channels. *United states department of agriculture. Agricultural Research Service*. 41-140. 15 pp.
- Samani, Z. & Magallanez, H. (1992). Hydraulic characteristics of a circular flume. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 117(4),559-567.
- Samani, Z. & Magallanez, H. (1993). Measuring water in trapezoidal canals. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 119(4), 181-189.
- Samani, Z. & Magallanez, H. (2000). Simple Flume for Flow Measurement in Open Channels. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 126(2), 127-129.
- Samani, Z. (2017). Three Simple Flumes for Flow Measurement in Open Channels. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 143(6), 04017010.

Flow Measurement in Trapezoidal Canals Using Prismatic Piers

E. Valizadegan* and S. Abbasi

* Corresponding Author: Assistant professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Khoy Branch, Khoy, Iran. E-mail: ebrahim.valizadegan@iaukhoy.ac.ir

Received: 31 October 2020, Accepted: 30 January 2021

Introduction

Flumes are one of the simple tools for measuring flow rate in canals that the flow rate can be calculate only by measuring the flow depth at specific points of control section of them. Blanger (1849) and Bazin (1896) were the first to conduct experimental and theoretical studying on flumes. Since then, many research was done about hydraulic characteristics of different flumes by researchers such as Parshl (1900), Robinson (1968), Samani and Magalanez (1992, 1993), Proginelly and Bonacci (1997), Prabhat (1998), Samani and Magalanez (2000), Bdar and Gare (2014), Davis and Samani (2016) and Mohammadi and Vatankhah (2020). Many of mentioned researchers have done their research on rectangular channels. In this research, possibility of the creating control section by installing a prismatic pier on the central axis of floor in trapezoidal canal and flow measurement in free and submerged flow condition was investigated.

Methodology

To achieve discharge equations, many experiments were performed in free and submerged flow conditions in a trapezoidal laboratory canal with length of 6 m, width of 46 cm, height of 70 cm and with adjustable side slope. Four prismatic piers with head angle of 90°, width of 42, 40, 38 and 36 cm were tested. The height of each pier was considered equal to its width. The experiments were performed on 4 side slopes.

Based on dimensional analysis, the following dimensionless equation was considered as basis of experiments for both free and submerged flow condition.

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = f\left(\frac{y_1}{B_c}\right) \quad (1)$$

where Q is discharge, g is gravity acceleration, y_1 is flow depth upstream of prismatic pier and B_c is calculated from the following equation.

$$B_c = B + 2zy_1 - b \quad (2)$$

where z is side slope of canal, B is width of canal and b is width of prismatic pier.

On the base of 96 experiment in free flow condition (in a certain side slope, 6 experiment for a pier) and 288 experiment in submerged flow condition (in a certain side slope, 18 experiment for a pier with different submergence ratios) discharge equations for both free and submergence flow condition were obtained separately.

Results and discussion

On the base of performed experiments, variation of dimensionless parameters $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ versus y_1/B_c corresponding to all 4 side slopes is presented in figure 1 and equations 3 and 4 in free and submerged flow condition respectively.

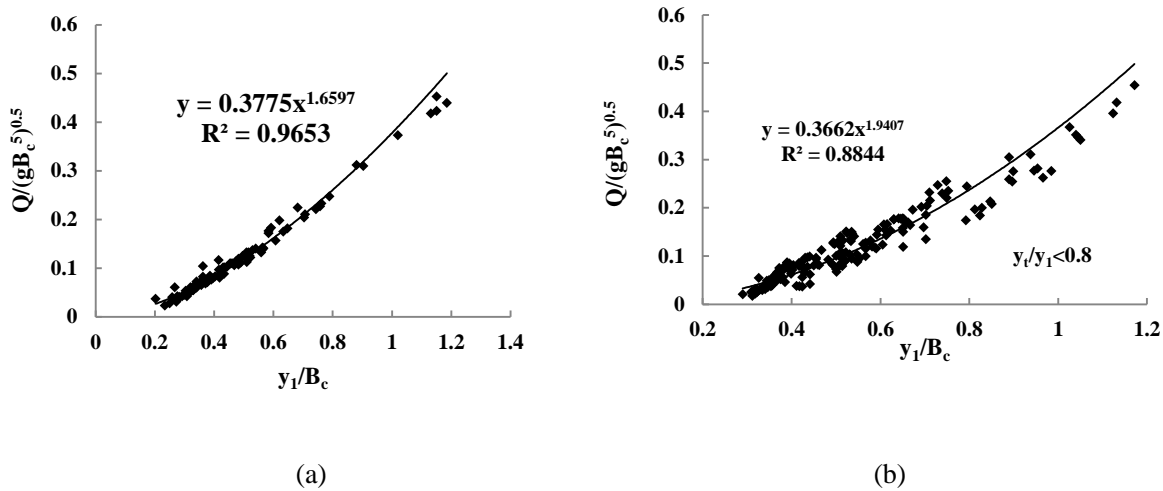


Fig. 6- Variation of y_1/B_c vs. $Q/(gB_c^5)^{0.5}$ for different side slopes, a; free flow b; submerged flow

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.3775 \left(\frac{y_1}{B_c} \right)^{1.6597} \tag{3}$$

$$\frac{Q}{\sqrt{gB_c^5}} = 0.3662 \left(\frac{y_1}{B_c} \right)^{1.9407} \tag{4}$$

According to equation 3 and 4, exponent of y_1 in both equation 3 and 4 is larger than circular, trapezoidal and S-M flumes which are presented by Samani and Magallanes (1992, 1993 and 2000). This makes this flume ideal for water level variations than circular, trapezoidal and S-M flumes. To determine accuracy of the obtained relationships and graphs, statistical parameters, *ME*, *RMSE* and *MARE*, were used. Based on the relationship for all side slopes (equation 3 and 4) *MARE* is 8.3 and 10.2% for free and submerged flow conditions respectively.

The results showed that, using of the flow measurement method in trapezoidal canals is Suitable for free flow conditions and can be used by accepting 12% error for submerged conditions.

Conclusions

The results showed that,

- Using of this flow measurement method (equation 3) in trapezoidal canals is ideal for free flow conditions.
- In submerged flow conditions, this flow measurement method (equation 4) in trapezoidal canals can be used by accepting 12% error.
- This flow measurement method Compared to circular, trapezoidal and S-M flumes, has large sensitivity to variation of upstream water level.
- It is suggested to the results of this research be used within the range of studied parameters.

Keywords: Free flow conditions, Irrigation Canals, Prismatic Flumes, Submerged Flow conditions